

АКУСТИКА ПОМЕЩЕНИЙ. МУЗЫКАЛЬНАЯ АКУСТИКА

УДК 534.843.242.2

РЕВЕРБЕРАЦИЯ В ТРАПЕЦИЕВИДНОМ ПОМЕЩЕНИИ

© 2013 г. Н. Г. Канев

Акустический институт им. Н.Н. Андреева

117036 Москва, ул. Шверника 4

E-mail: nikolay.kanev@mail.ru

Поступила в редакцию 30.01.2013 г.

Рассмотрена задача о затухании звука в трапециевидном помещении с неравномерным распределением поглощения на стенках. Показано, что затухание звуковой энергии может происходить anomalously медленно по закону, близкому к степенному $\sim 1/t$, или достаточно быстро — по экспоненциальному. Установлено, что вид закона затухания зависит от наличия устойчивых лучевых траекторий в помещении. Проявление устойчивых лучевых траекторий продемонстрировано в лабораторном и натурном экспериментах.

Ключевые слова: реверберация, трапециевидное помещение, порхающее эхо.

DOI: 10.7868/S0320791913050109

ВВЕДЕНИЕ

В прямоугольных помещениях закон затухания звука может существенно отличаться от классического закона Сэбина [1], в соответствии с которым звуковая энергия в помещении экспоненциально уменьшается со временем. Это происходит тогда, когда поглощение распределено неравномерно на стенках помещения [2, 3], в этом случае закон затухания имеет степенной вид. В помещениях более сложной формы, а в пределе в хаотичных помещениях, чаще всего закон затухания звука близок к экспоненциальному, но при некоторых вариантах неравномерного распределения поглощения на стенках помещения затухание звука также может происходить по закону, близкому к степенному [4]. Представляет интерес определить, как изменяется закон затухания звука в простом помещении при малых изменениях его формы. Для прямоугольного помещения малым изменением может являться, например, поворот одной его стенки на небольшой угол.

В настоящей работе исследуется реверберация в двумерном помещении, имеющем форму прямоугольной трапеции. Акустические свойства стенок характеризуются коэффициентом звукопоглощения, при этом каждая стенка является гладкой, т.е. не рассеивающей звук. Задача о затухании звука решается в приближении геометрической акустики: в первую очередь выполняется численное моделирование затухания звуковой энергии в помещении, а затем полученный результат интерпретируется с точки зрения существования устойчивых лучевых траекторий. Также приводятся результаты лабораторного эксперимента, качественно демонстрирующие результаты, полученные

численно, а на примере из практики показана связь между устойчивыми лучевыми траекториями и эффектом порхающего эхо.

Отметим, что точное решение задачи о затухании звука в помещении может быть получено только в рамках волновой модели, в которой определяются коэффициенты затухания каждой моды. Для двумерного прямоугольного помещения коэффициенты затухания мод найдены в работе [5]. Расчет в лучевом приближении совпадает с волновой моделью только при учете всех мод, но на практике частотная полоса, в которой возбуждается звук, как правило, ограничена. Поэтому в пределе $t \rightarrow \infty$, где t — время, закон затухания звука будет определяться самой медленно затухающей модой. Так, для прямоугольного помещения с одной поглощающей стенкой (коэффициент поглощения близок к 1), энергия моды, соответствующей частоте ω' , уменьшается по закону

$$E(t) \sim \exp\left(-\frac{\pi^2 c^2}{2H^2 \omega'} t\right), \text{ где } c \text{ — скорость звука, } H \text{ —}$$

длина параллельных непоглощающих стенок. Поэтому при ограничении частотной полосы сверху $\omega < \omega'$ расчет в лучевом приближении справедлив для начального процесса, длительность которого составляет $t \sim \frac{2H^2 \omega'}{\pi^2 c^2}$. Вместе с тем,

описание начального этапа реверберации является наиболее важным для архитектурной акустики.

ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Для определения законов затухания звука выберем помещение в форме прямоугольной трапе-

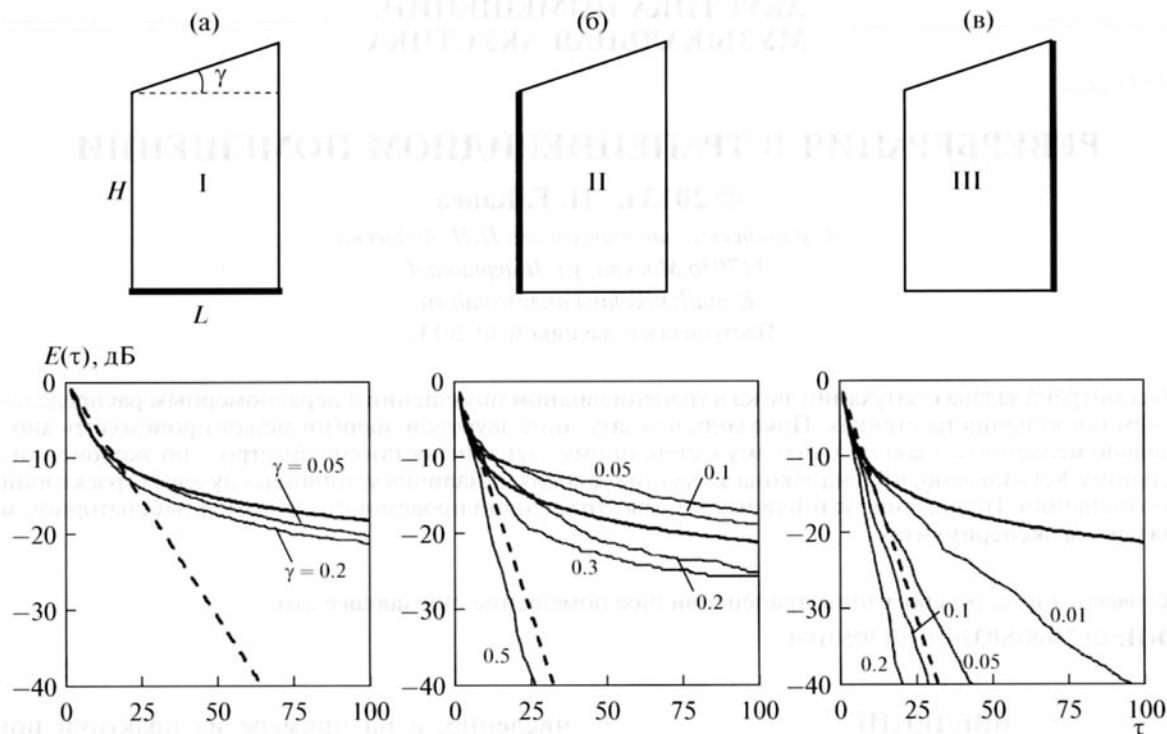


Рис. 1. Расчет затухания звуковой энергии в трапециевидном помещении с размерами $L : H = 2 : 1$ с различным распределением звукопоглощения на стенках: толстыми линиями выделены поглощающие стенки. Значения, обозначающие кривые затухания на графиках, соответствуют углу γ между непараллельными стенками. Толстые линии на графиках — кривые затухания в прямоугольном помещении ($\gamma = 0$), пунктирные линии — затухание по Сэбину.

ции (рис. 1): длина короткого основания H , длина стенки, перпендикулярной основаниям, L , угол между непараллельными стенками γ . Рассмотрим три варианта распределения поглощения на стенках помещения: в помещении I поглощающей является стенка, перпендикулярная основаниям, в помещении II — короткое основание, в помещении III — длинное основание. Коэффициент звукопоглощения примем равным $\alpha = 0.9$.

Численное моделирование выполняется при помощи метода лучевых траекторий [6]. Из геометрического центра помещения выпускается 3600 лучей, равномерно распределенных по углу. Далее отслеживается траектория каждого луча, и при отражении луча от поглощающей стенки его энергия уменьшается на коэффициент α . Звуковая энергия в помещении определяется суммой энергий всех лучей. Графики на рис. 1 демонстрируют результаты расчета звуковой энергии в помещении с размерами $L : H = 1 : 2$ в зависимости от безразмерного параметра времени $\tau = ct/H$. Жирными сплошными линиями на всех графиках представлена кривая затухания для прямоугольного помещения, т.е. для $\gamma = 0$. В прямоугольном помещении затухание звука происходит по степенному закону $E(t) \sim 1/t$ [2, 3]. Пунктирные линии представляют экспоненциальный закон затухания

Сэбина $E(t) = \exp(-ctP\bar{\alpha}/\pi S)$, где P — периметр помещения, S — его площадь, $\bar{\alpha}$ — средний коэффициент звукопоглощения.

В помещении I (рис. 1а) законы затухания для разных значений угла наклона γ мало отличаются от закона затухания, имеющего место в прямоугольном помещении. При этом для значений $\gamma > 0.2$ кривая затухания практически не отличается от кривой для $\gamma = 0.2$. Таким образом, в трапециевидном помещении I затухание звуковой энергии происходит anomalously медленно, как и в прямоугольном помещении.

В помещении II (рис. 1б) при малых углах γ закон затухания также близок к степенному. При этом для $\gamma \leq 0.1$ кривая затухания в трапециевидном помещении лежит выше кривой затухания в прямоугольном помещении. По мере увеличения угла γ кривая затухания опускается, но закон затухания остается близким к $1/t$. Начиная с некоторого значения γ (в данном случае это значение находится между 0.3 и 0.5), закон затухания становится экспоненциальным. Согласно расчетам этот переход оказывается довольно резким: пока значения γ не достигают порогового значения, кривые затухания близки к кривой для $\gamma = 0.3$, а при значениях γ , больших порогового, кривые затухания близки к закону Сэбина.

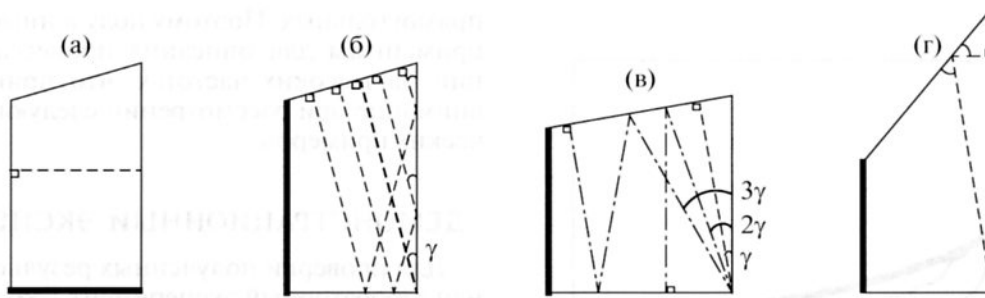


Рис. 2. Устойчивые лучевые траектории в трапециевидном помещении. Поглощающая стенка помещения выделена жирной линией.

В помещении III (рис. 1в) кривая затухания даже при малом угле $\gamma = 0.01$ близка к экспоненте для $\tau > 25$. При увеличении угла γ закон затухания становится экспоненциальным, при этом скорость экспоненциального затухания может быть больше, чем по закону Сэбина.

Отметим, что при равномерном распределении поглощения на стенках помещения закон затухания, как и в прямоугольном помещении [2], близок к закону Сэбина. Таким образом, численный эксперимент показал, что закон затухания зависит от распределения поглощения на стенках помещения.

Отдельно выделим следующий результат. Кривые затухания звука в помещениях II и III при $\gamma = 0.05$ существенно различаются. Однако оба эти помещения по форме мало отличаются от прямоугольного. Помещение II можно получить из прямоугольного, отклонив короткую стенку на угол 0.05 в сторону поглощающей стенки, при этом затухание звука остается аномально медленным. Помещение III также можно получить из прямоугольного, для чего короткую стенку нужно отклонить на тот же угол, но в противоположную сторону, при этом закон затухания становится экспоненциальным. Следовательно, закон затухания может радикально измениться при малом изменении формы помещения.

УСТОЙЧИВЫЕ ЛУЧЕВЫЕ ТРАЕКТОРИИ

Медленное затухание звуковой энергии имеет место в помещениях, в которых существуют устойчивые лучевые траектории, т.е. такие траектории, которые не попадают на поглощающие стенки. Простейшие устойчивые лучевые траектории существуют в помещениях с параллельными непоглощающими стенками, они представляют собой линии, перпендикулярные параллельным стенкам. В прямоугольном помещении закон затухания при наличии устойчивых траекторий имеет вид $E(t) \sim 1/t$ [2].

В трапециевидном помещении, основания которого являются отражающими, а поглощающи-

ми являются одна (рис. 2а) или две непараллельные стенки, устойчивые траектории, как и в прямоугольном помещении, перпендикулярны основаниям. Эти траектории существуют при любом угле γ между непараллельными стенками, поэтому закон затухания близок к $E(t) \sim 1/t$ (рис. 1а) и слабо зависит от γ .

В помещении с поглощающим коротким основанием (помещение II на рис. 1) также существуют устойчивые траектории. На рис. 2б построены однотипные устойчивые траектории, которые перпендикулярны наклонной стенке и падают на длинное основание под углом $\gamma_1 = \gamma$. Для упрощения этот тип устойчивых траекторий обозначим одной траекторией, попадающей точно в угол помещения (она выделена на рис. 2б жирным пунктиром). Также в помещении II могут существовать другие типы устойчивых траекторий (рис. 2в). Их свойства таковы: угол между одним из прямолинейных отрезков траектории и основаниями трапеции кратен γ , и траектория перпендикулярна одной из непараллельных стенок. Каждый тип траекторий можно характеризовать углом $\gamma_n = n\gamma$. Из построения на рис. 2в ясно, что с увеличением угла наклона γ траектории попадают на поглощающую стенку при некотором его значении и перестают быть устойчивыми. Устойчивые траектории, показанные на рис. 2б, существуют при условии $\text{tg} \gamma < L/H$.

При дальнейшем увеличении угла наклона возникает новый тип устойчивых траекторий (рис. 2г) для значений $\text{tg} \gamma > 1$. Можно сформулировать условие, при котором в помещении II не существуют устойчивые траектории

$$L/H < \text{tg} \gamma < 1. \quad (1)$$

При выполнении условия (1) затухание звука происходит по экспоненциальному закону. Также из (1) следует, что в помещении, для которого $L/H > 1$, устойчивые траектории существуют при любом угле наклона γ .

На рассмотренном выше расчетном примере для помещения II с размерами $L : H = 1 : 2$ можно проверить выполнение условия (1), которое име-

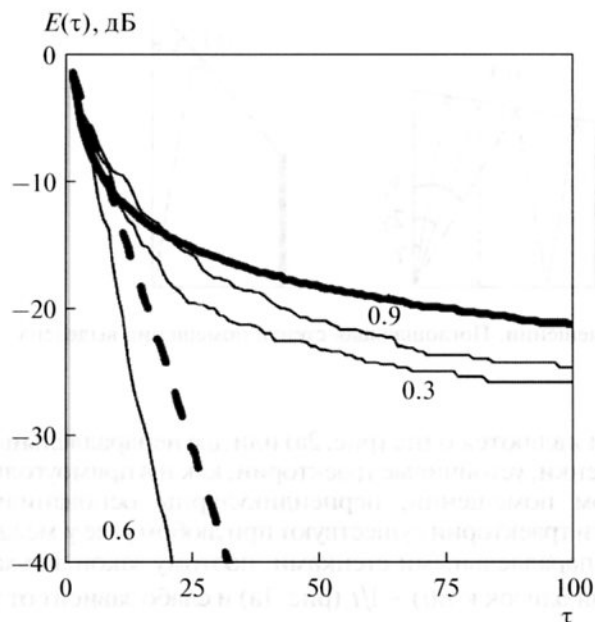


Рис. 3. Расчет затухания звуковой энергии в помещении II на рис. 1 для различных значений угла γ между непараллельными стенками. Толстая линия — степенной закон затухания $1/\tau$, имеющий место в прямоугольном помещении ($\gamma = 0$), пунктир — экспоненциальное затухание по Сэбину.

ет вид $0.46 < \gamma < 0.79$. Рассчитаем кривые затухания для помещения с углами $\gamma = 0.3, 0.6, 0.9$ (рис. 3). Для значений 0.3 и 0.9 устойчивые траектории существуют и затухание звука происходит аномально медленно. При $\gamma = 0.6$ устойчивых траекторий нет, и затухание экспоненциально, при этом оно происходит даже быстрее, чем по закону Сэбина.

Из построения лучевых траекторий в помещении II ясно, что все траектории попадают на длинное основание, поэтому, если оно является поглощающим (помещение III на рис. 1), то устойчивых траекторий не существует и затухание звука происходит по экспоненциальному закону при любом угле наклона $\gamma > 0$. Из результатов расчета на рис. 1в также следует, что даже при малом угле наклона закон затухания существенно отличается от степенного $E(t) \sim 1/t$, имеющего место в прямоугольном помещении, т.е. при $\gamma = 0$.

Кратко обсудим полученные результаты с точки зрения волнового подхода. Как отмечено выше, в прямоугольном помещении с одной поглощающей стенкой при ограничении частотной полосы закон затухания в пределе $t \rightarrow \infty$ становится экспоненциальным, причем скорость экспоненциального затухания зависит от самой медленно затухающей моды в заданной полосе частот. Аналогичная ситуация имеет место для трапециевидных помещений, хотя определение собственных мод для них [7, 8] существенно сложнее, чем для

прямоугольных. Поэтому полученные результаты применимы для описания процесса реверберации на высоких частотах, что принимается во внимание при рассмотрении следующих практических примеров.

ДЕМОНСТРАЦИОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Для проверки полученных результатов выполнен лабораторный эксперимент, в котором исследовалось затухание в помещении, размеры которого указаны на рис. 4а. В данном помещении стенки $ABCD$ и $A_1B_1C_1D_1$ параллельны, угол между стенками AA_1D_1D и BB_1C_1C составляет 6° , угол между стенками ABB_1A_1 и DCC_1D_1 — 8° . При этом стенка AA_1D_1D перпендикулярна стенкам $ABCD$ и $A_1B_1C_1D_1$, других пар стенок, образующих прямой угол, в помещении нет. Все стеки помещения выполнены из кирпича, оштукатурены и окрашены, поэтому их коэффициент поглощения имеет малые значения.

В проведенном эксперименте параллельные стенки поочередно покрывались звукопоглощающим материалом (минераловатная плита толщиной 5 см) по всей площади. Сначала (помещение А на рис. 4а) звукопоглотителем покрывалась стенка меньшего размера, т.е. стенка $ABCD$. В этом случае устойчивые лучевые траектории существуют, отражение лучей происходит от стенок BB_1C_1C , $A_1B_1C_1D_1$ и AA_1D_1D . Стенки $A_1B_1C_1D_1$ и AA_1D_1D образуют прямоугольный уголкового отражателя такой же, как в трапециевидном помещении II на рис. 1. Устойчивые траектории лежат в плоскостях, перпендикулярных сторонам $ABCD$ и AA_1D_1D , и имеют в этих плоскостях вид как на рис. 2в. Таким образом, устойчивые траектории в трехмерном помещении А на рис. 4а эквивалентны устойчивым траекториям в двумерном помещении. Во втором случае (помещение Б на рис. 4а) звукопоглотителем покрывалась стенка большего размера, т.е. стенка $A_1B_1C_1D_1$. В этом помещении, как и в трапециевидном помещении с поглощающим длинным основанием (помещение III на рис. 1), устойчивые траектории не существуют.

На рис. 4б представлены кривые затухания в октавной полосе со среднегеометрической частотой 4000 Гц, измеренные в помещениях А и Б. Отметим, что кривые, измеренные в разных точках помещения, очень близки друг к другу, поэтому приведены только по одной кривой для каждого варианта распределения поглощения на стенках помещения. Из представленных графиков следует, что в помещении Б затухание звука происходит существенно быстрее, чем в помещении А. В обоих случаях спад близок к экспоненциальному закону, поэтому можно оценить время реверберации: для помещения А оно составляет 0.27 с, а для помещения Б — 0.11 с. Таким образом, в зависи-

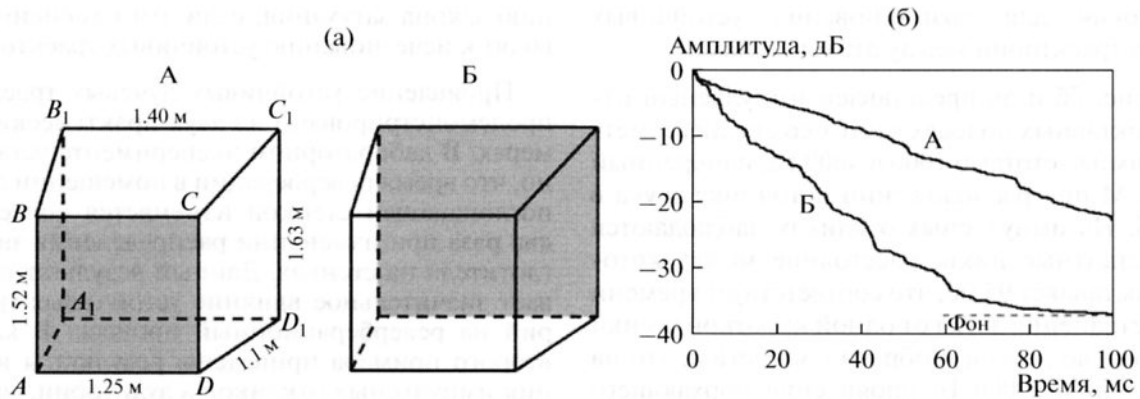


Рис. 4. Кривые затухания (б) в октавной полосе частот со среднегеометрической частотой 4000 Гц, измеренные в помещении с двумя параллельными стенками (а) при различном распределении звукопоглощения. Серым цветом выделена поглощающая стенка.

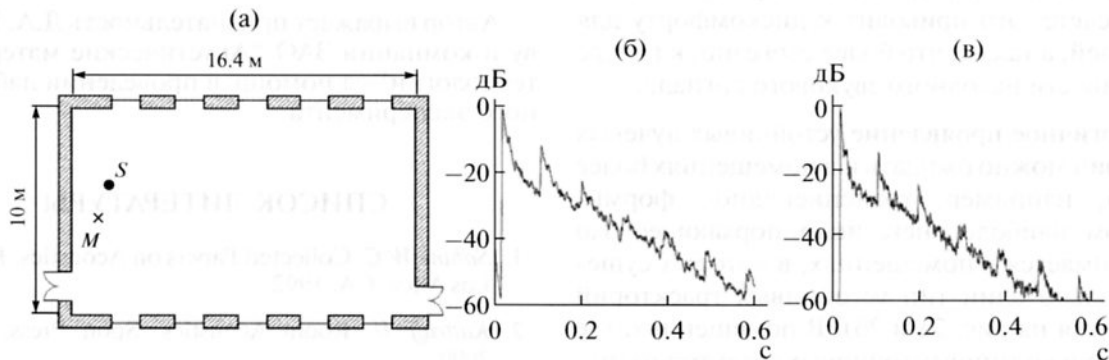


Рис. 5. Измерение импульсного отклика в аудитории (а), S — положение источника звука, M — положение микрофона. Импульсные отклики измерены в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами 2000 Гц (б) и 4000 Гц (в).

мости от способа расположения звукопоглощающего материала время реверберации помещения изменяется более, чем в два раза, хотя площадь звукопоглощающего материала в помещении Б всего на 20% больше, чем в помещении А.

Обратим внимание, что затухание звука в помещении А происходит по закону, близкому к экспоненциальному, в то время как согласно результатам численного эксперимента (рис. 1б) закон затухания должен иметь вид, близкий к степенному. Это связано с тем, что параллельная стенка большей площади (отмечена серым цветом в помещении Б) на самом деле не является плоской — на ней расположена дверца, выступающая внутрь помещения, через которую осуществляется доступ в помещение, а также на этой стенке размещены излучатели звука. Поэтому на высоких частотах эта стенка обладает звукорассеивающими свойствами, что, как показано в работе [9], приводит к более быстрому по сравнению со степенным законом затуханию звука.

ПОРХАЮЩЕЕ ЭХО

На практике проявление устойчивых лучевых траекторий наряду с влиянием на время реверберации связано с явлением порхающего эха в помещениях. Чаще всего порхающее эхо наблюдается в помещениях с параллельными отражающими стенками (как на рис. 2а), если при этом другие поверхности обладают существенным звукопоглощением.

В качестве примера приведем импульсный отклик, записанный в аудитории прямоугольной формы (рис. 5а). Потолок аудитории выполнен разноуровневым, на длинных стенах расположено несколько оконных проемов, закрытых плотными шторами, на полу размещен стол для заседаний и около 50 мягких кресел. Таким образом, две длинные стены, потолок и пол имеют значительные звукопоглощающие и звукорассеивающие свойства. Вместе с тем, короткие стены являются плоскими и звукоотражающими, что созда-

ет условия для возникновения устойчивых лучевых траекторий между этими стенами.

На рис. 5б и 5в представлен импульсный отклик в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами 2000 и 4000 Гц, измеренный в точке М при расположении источника звука в точке S. На импульсных откликах наблюдаются эквидистантные пики, расстояние между которыми составляет 95 мс, что соответствует времени распространения звука от одной короткой стенки аудитории до другой и обратно. Отметим, что на частотах ниже 2000 Гц проявление порхающего эха на импульсных откликах значительно слабее. Субъективно порхающее эхо воспринимается как многократно повторяющиеся отзвуки, которые разрешаются как отдельные сигналы из-за большого временного интервала между ними. В конечном счете, это приводит к дискомфорту для слушателей, а также, что более серьезно, к потере разборчивости исходного звукового сигнала.

Аналогичное проявление устойчивых лучевых траекторий можно ожидать и в помещениях более сложной, например, трапециевидной формы. При этом наиболее негативно порхающее эхо воспринимается в помещениях, в которых существует только один тип устойчивых траекторий (помещения на рис. 2а и 2б). В помещениях, где есть несколько типов устойчивых траекторий (например, помещение на рис. 2в), несколько порхающих эхо накладываются друг на друга, что приводит к уменьшению расстояния между пиками в импульсном отклике, а сами пики становятся не эквидистантными. Поэтому вместо одиночных отзвуков с большими временными интервалами мы имеем более равномерное затухание звука, что по восприятию ближе к обычному реверберационному процессу в помещении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализированы законы затухания звука в трапециевидном помещении при неравномерном распределении поглощения на его стенках. Показано, что закон затухания зависит от существования в помещении устойчивых лучевых траекторий: если устойчивые траектории существуют, то затухание происходит аномально медленно по закону близкому к степенному $1/t$, в противном случае достаточно быстро — по экспоненциальному закону. При этом малые изменения формы прямоугольного помещения с одной поглощающей стенкой, в котором затухание звука происходит медленно, могут привести к резкому измене-

нию закона затухания, если эти изменения приводят к исчезновению устойчивых траекторий.

Проявление устойчивых лучевых траекторий продемонстрировано на двух практических примерах. В лабораторном эксперименте установлено, что время реверберации в помещении с одной поглощающей стенкой изменяется более чем в два раза при изменении распределения звукопоглотителя на стенках. Данный результат показывает значительное влияние устойчивых траекторий на реверберационный процесс. В качестве второго примера приведены результаты измерения импульсных откликов в аудитории, на которых зафиксированы эквидистантные пики, воспринимаемые слушателями как отдельные и многократные отзвуки. Это явление обычно называется порхающим эхо и признается дефектом акустики помещения.

Автор выражает признательность Д.А. Шамакову и компании ЗАО “Акустические материалы и технологии” за помощь в проведении лабораторного эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sabine W.C. Collected Papers on Acoustics. Peninsula, Los Altos. CA. 1992.
2. Kuttruff H. Room Acoustics. Spon Press, London. 2000.
3. Канев Н.Г. Затухание звука в прямоугольном помещении с импедансными стенками // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 5. С. 656–662.
4. Mortessagne F., Legrand O., Sornette D. Role of the absorption distribution and generalization of exponential reverberation law in chaotic rooms // J. Acoust. Soc. Am. 1993. V. 94. P. 154–161.
5. Shabalina E.D., Shirgina N.V., Shanin A.V. High-frequency modes in a two-dimensional rectangular room with windows // Acoust. Phys. 2010. V. 56. № 4. P. 525–536.
6. Помпеи А., Сумбатян М.А., Тодоров Н.Ф. Виртуальные компьютерные модели помещений: метод лучевых траекторий и алгоритмы аурализации // Акуст. журн. 2009. Т. 55. № 6. С. 760–771.
7. Лапин А.Д. Отражение нормальных волн от скошенного конца прямоугольного волновода // Акуст. журн. 1963. Т. 9. № 1. С. 120–122.
8. Sum K.S., Pan J. Effects of the inclination of a rigid wall on the free vibration characteristics of acoustic modes in a trapezoidal cavity // J. Acoust. Soc. Am. 2006. V. 119. P. 2201–2210.
9. Kanev N. Sound decay in a rectangular room with specular and diffuse reflecting surfaces // Proc. Forum Acusticum. June 27–July 1. 2011. Aalborg, Denmark. P. 1935–1940.